

# NUEVOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES BIODEGRADABLES CON REACTORES BIOMEMBRANA AUTOAIREADOS

## Alfredo Jácome (\*)

Universidade da Coruña. Ingeniero Químico por la U. de Guayaquil (1987); Master en Ingeniería Sanitaria y Ambiental por la U. de Cantabria (1990); Doctor en Ingeniería Ambiental por la U. de Cantabria (1999); Ingeniero del Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias (1983 – 1989); Investigador del Grupo de Ingeniería Ambiental de la U. de Cantabria (1989 – 1995); Profesor de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la ETS. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña (desde 1995).

## Judith Molina

Universidade da Coruña

## Joaquín Suárez

Universidade da Coruña

## Iñaki Tejero

Universidad de Cantabria

(\*): ETSI. Caminos, Campus de Elviña, 15071 Coruña (España). Tlf. 34 981167000, Fax 34 981167170, e-mail [jacome@iccp.udc.es](mailto:jacome@iccp.udc.es)

## RESUMEN

Se evalúa la cinética de oxidación de materia orgánica y la transferencia de oxígeno de una biopelícula desarrollada sobre una membrana hidrófoba permeable a gases del tipo fibra hueca de material polipropileno. La carga orgánica eliminada, que sigue un modelo de saturación respecto a la carga aplicada, alcanza un valor máximo aproximado de  $75 \text{ g DQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . En función de la carga orgánica eliminada la biopelícula alcanza espesores de hasta 3 mm (rango: 1 a 3 mm). Debido a la resistencia al transporte de oxígeno la biopelícula es de tipo estratificada, con una zona aerobia y otra anóxica. Para el crecimiento celular aerobio la biopelícula, de forma natural, absorbe oxígeno a través de las fibras huecas que están llenas de aire a presión atmosférica. Por lo tanto, se trata de una biopelícula no convencional que, en contracorriente, absorbe oxígeno atmosférico a través del soporte (interfase membrana -biopelícula) y consume sustrato orgánico a través de la interfase biopelícula -agua. Como el afluente del proceso tiene oxígeno disuelto, una fracción del oxígeno consumido se suministra desde el seno líquido. Mediante ensayos de aireación en estado transitorio se determinó la capacidad de transferencia de oxígeno de las fibras huecas limpias, antes del arranque del proceso. Sin biopelícula la transferencia de oxígeno a través de las fibras huecas es de  $5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Mientras que con la biopelícula desarrollada el flujo de oxígeno a través de la biomembrana (fibra hueca + biopelícula) alcanza un valor máximo de  $25 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Aplicando principios básicos de estequiometría de reacciones y de balance de materia es posible estimar el aporte de oxígeno desde cada fuente: aire y agua. El flujo de oxígeno a través de las fibras huecas con biopelícula llega a representar hasta un 90 % del oxígeno total consumido (rango 70 al 90 %), mientras que el restante 10 % corresponde al oxígeno disuelto aportado por el agua residual afluente (rango: 10 al 30 %). Es decir, la biopelícula se autoairea en buen grado. El incremento de la transferencia de oxígeno debido a la auto-aireación de la biopelícula depende principalmente de la carga orgánica eliminada. Sin embargo, podrían influir otros factores como por ejemplo la movilidad de los microorganismos que generaría microturbulencias produciendo una difusividad activa bioturbulenta de mayor magnitud que la difusión molecular en la biopelícula.

**Palabras claves:** biomembrana, biopelícula autoaireada, aguas residuales, tratamiento biológico.

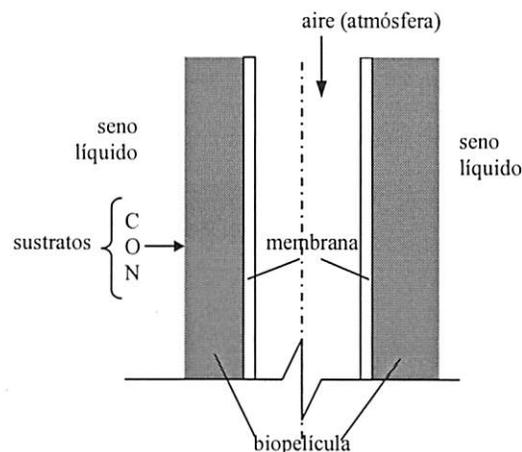
## INTRODUCCIÓN

Hay tratamientos biológicos de aguas residuales que emplean membranas como soporte de biopelícula. Se considera que el conjunto membrana y biopelícula forman una membrana de dos capas: una inerte (membrana) y otra activa (biopelícula). Al conjunto membrana-biopelícula se denomina biomembrana, y a los reactores de este tipo se los conoce como reactores biomembrana (Osa *et al.* 1997). En algunos de estos reactores la membrana cumple otra función además de la de soporte. En el caso que aquí se describe, la membrana funciona como sistema de aireación ya que pone en contacto a la biopelícula con el aire atmosférico. Por lo tanto, la membrana tiene que ser

hidrófoba y permeable a gases. Así, un nuevo tipo de reactor aparece: reactor biomembrana de soporte permeable a gases. Varios diseños de este tipo de reactores hay disponibles en la bibliografía (Onishi y Numazawa, 1982; Timberlake *et al.*, 1988; Abdel-Warith *et al.*, 1990; Eguía, 1991; Vidart, 1992; Osa *et al.*, 1997; Jácome, 1999).

La biopelícula es oxigenada o aireada a través de la membrana a la que está adherida, mientras que el aporte de sustrato procede del seno líquido (Fig. 1). De esta particularidad se derivan importantes ventajas:

- En una misma biopelícula encontramos una capa aerobia (próxima al soporte) y otra anóxica, lo cual permitiría realizar simultáneamente oxidación de materia orgánica y nitrificación - desnitrificación. En fangos activos y lechos fluidizados, el agua es sometida de modo alterno, mediante recirculación, a tratamiento aerobio y anóxico para que puedan producirse las reacciones necesarias.
- En biodiscos y lechos bacterianos también podemos encontrar dos capas en la biopelícula: aerobia y anóxica. Sin embargo, la ubicación de la capa anóxica cerca del soporte suele provocar fermentación y desprendimiento masivo de biopelícula. En los sistemas de membrana permeable a gases, el suministro de aire por la capa más interna de la biopelícula evita este problema, el desprendimiento masivo no ocurre, así la biopelícula puede alcanzar edades que permiten el desarrollo de los microorganismos necesarios para las reacciones antes citadas.
- Por otro lado, en la depuración de aguas residuales con reactores biomembrana se puede reducir considerablemente la producción de lodos (Eguía, 1991).



**Figura 1: Sección longitudinal de una biomembrana (membrana de fibra hueca recubierta de biopelícula)**

Lolmede *et al.* (1993) realizaron ensayos pioneros con reactores biomembrana sobre la transferencia de oxígeno a la biopelícula sin emplear equipos de aireación. Las pruebas se basaron en dejar la cámara de aireación de las membranas expuesta a la atmósfera. En efecto, observaron que los procesos de oxidación eran factibles, aunque los rendimientos alcanzados no fueron muy elevados.

Stensel y sus colaboradores han realizado varios estudios sobre la transferencia mejorada de oxígeno en reactores biopelícula, llegando a la conclusión de que la transferencia interfacial de oxígeno (interfase biopelícula/aire) puede significar una vía muy importante de entrada de oxígeno en estos sistemas. En uno de sus trabajos realizaron observaciones del consumo de oxígeno por la biopelícula de lechos bacterianos (Hinton y Stensel, 1994) y concluyeron que: 1) el flujo consumido de oxígeno incrementa proporcionalmente a la concentración de DQO soluble del afluente (rango: 40 a 120 mg/L de DQO soluble), y 2) el flujo consumido de oxígeno es tres veces mayor que la capacidad de oxigenación del sistema sin biopelícula.

En biodiscos también se ha observado mejoras en la transferencia de oxígeno. Paolini (1986) observó el efecto de la biomasa sobre la transferencia de oxígeno en un RBC, y concluyó que la presencia de la biopelícula mejora esta transferencia. La mejora de la transferencia fue significativa a bajas

velocidades de giro de los discos. Amieva (1993) y Bezanilla (1993) también llegaron a observar una mayor eficiencia en la oxigenación de un sistema de biodiscos cuando éstos estuvieron recubiertos por la biopelícula.

Los objetivos del trabajo que aquí se presenta fueron: 1) observar la cinética de oxidación orgánica de una biopelícula autoaireada desarrollada en un reactor biomembrana de fibra hueca, y 2) evaluar la transferencia de oxígeno mejorada por vía biológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó un reactor a escala de laboratorio construido con tubo de metacrilato de un espesor de 5 mm y un diámetro interior de 90 mm.

El material soporte consistió en 8 membranas de fibra hueca de polipropileno (Accurel® PP) con un poro de  $0.20 \mu\text{m}$ , punto de burbuja de 0.95 bar, espesor de  $450 \mu\text{m}$  y diámetro interno de  $1800 \mu\text{m}$ . El volumen efectivo del reactor fue de 1.4 L y la superficie húmeda de fibras fue de  $0.036 \text{ m}^2$ . Un extremo de las fibras huecas quedó expuesto a la atmósfera.

El reactor fue alimentado con un agua residual sintética conteniendo glucosa como fuente de carbono, además de amonio, fósforo y oligoelementos. Para la colonización inicial de las fibras huecas se utilizó como inóculo pequeñas dosis de agua residual urbana decantada.

El reactor fue agitado mecánicamente para conseguir mezcla completa, lo cual fue comprobado experimentalmente mediante la técnica de trazadores. Un esquema del sistema experimental se presenta en la Figura 2.

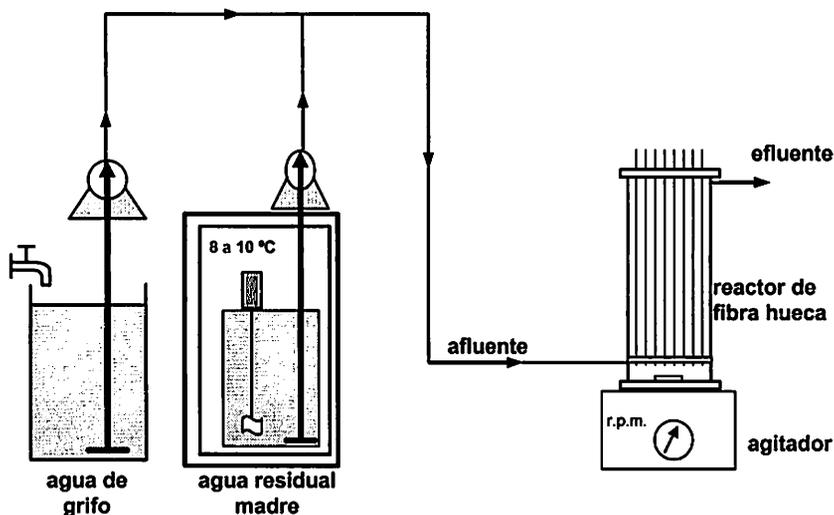


Figura 2: Esquema del sistema experimental

Para el control del proceso se determinó la DQO, sólidos en suspensión (SS), amonio, nitrato, oxígeno disuelto (OD), pH, temperatura y alcalinidad. Los análisis de las muestras se realizaron siguiendo las técnicas del Standard Methods (APHA, 1992). Amonio, nitrato y OD se midieron con electrodos selectivos.

El espesor de biopelícula se midió utilizando un calibre micrómetro.

Se midió el coeficiente de transferencia de oxígeno global de las fibras huecas mediante un ensayo típico de aireación en régimen transitorio de agua desoxigenada hasta alcanzar un nivel de OD próximo a saturación. Los pasos del ensayo de aireación consisten en: 1) se llena el reactor con agua destilada; 2) se desoxigena el agua añadiendo 60 mg/L de sulfito ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) y 0.2 mg/L de Co ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) y, 3) cuando empieza a incrementar el OD, se toma lecturas del OD a intervalos de tiempo predeterminados. Se utilizó el siguiente modelo lineal para evaluar el coeficiente de transferencia de oxígeno, K:

$$\ln(C_s - C_{(t)}) = \ln(C_s - C_{(0)}) - \frac{A^*}{V} K t \quad (1)$$

donde  $C_s$  = OD a saturación (mg/L);  $C_{(0)}$  y  $C_{(t)}$  = OD en el seno líquido en los instantes  $t = 0$  y  $t = t$ , respectivamente (mg/L);  $A^*$  = área efectiva de contacto entre las fibras huecas y el agua ( $m^2$ );  $V$  = volumen de agua ( $m^3$ );  $t$  = tiempo (h); y  $K$  = coeficiente de transferencia de oxígeno global (m/d).

## RESULTADOS Y DISCUSION

El reactor fue explotado bajo diferentes condiciones operacionales. La DQO afluente se varió de 40 a 300 mg/L. El OD en el seno líquido fluctuó entre 0.0 y 3.7 mg/L. El TRH osciló entre 0.7 y 2 horas. El pH fue de 6.8 a 7.2.

La colonización del soporte fue rápida, antes de 24 horas todas las fibras huecas estaban recubiertas. La biopelícula inicialmente tuvo un color claro. Una vez que la fase experimental avanzó 30 a 45 días su color fue similar al de un café con leche poco cargado y así se mantuvo hasta el final. En cuanto a su estructura, inicialmente fue poco compacta. Después se tornó muy compacta. El espesor alcanzó valores de hasta 3 mm, predominando un rango de 1 a 2 mm.

**Capacidad de oxigenación de las fibras huecas sin biopelícula.**- Mediante la utilización de la Ec. 1 para el ajuste de los datos experimentales de los ensayos de aireación (Fig. 3) se obtiene para el coeficiente de transferencia de oxígeno  $K$  un valor de  $0.87 \text{ m d}^{-1}$ . Por tanto, la capacidad de oxigenación de las fibras huecas sin biopelícula se estima en  $5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Por otra parte, la capacidad de transferencia de oxígeno observada está en el orden de lo que se consigue en sistemas biopelícula convencionales como biodiscos y lechos bacterianos. En biodiscos es muy común obtener transferencias de oxígeno en torno a los  $7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

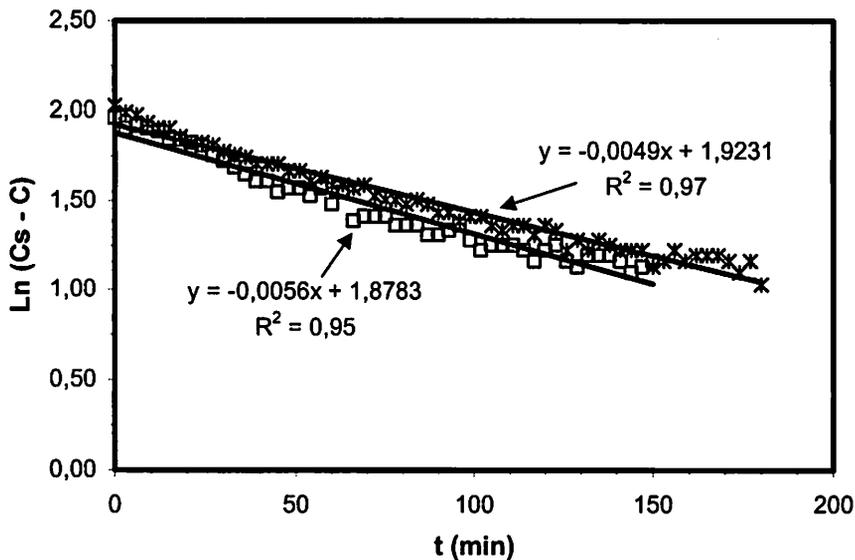
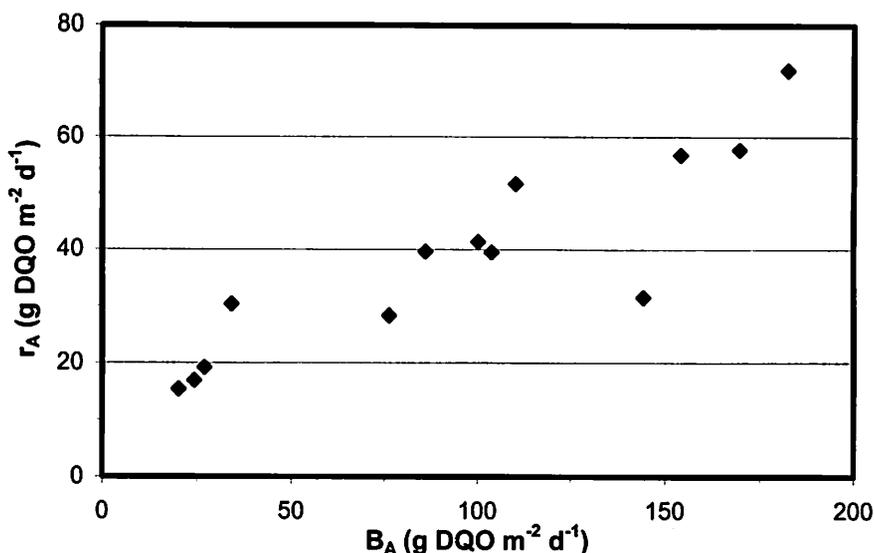


Figura 3: Ajuste lineal (Ec. 1) de los resultados de los ensayos de aireación

**Cinética de la eliminación de materia orgánica.**- La carga orgánica aplicada osciló entre 25 y 200  $\text{g DQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , es decir, se trabajó desde baja carga hasta muy alta carga orgánica.

Con un crecimiento homogéneo de biopelícula la carga orgánica eliminada,  $r_A$ , siguió aproximadamente un modelo de saturación con respecto a la carga aplicada  $B_A$  (Fig. 4):



**Figura 4: Cinética observada de la eliminación de DQO en un reactor biomembrana autoaireado**

En la Figura 4,  $B_A$ ;  $r_A$  = carga orgánica aplicada y eliminada, respectivamente (g DQO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Mediante balance de materia se comprobó que la DQO fue eliminada tanto por vía aerobia (oxidación orgánica) como anóxica (desnitrificación). Mediante oxidación orgánica aerobia se elimina un máximo de 60 g DQO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> mientras que por vía anóxica se elimina hasta 15 g DQO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Otros investigadores también han observado elevadas cargas de eliminación de materia orgánica. Eguía (1991) trabajó con un reactor biomembrana con soporte de teflón, insuflando oxígeno puro a la biopelícula y con una elevada carga orgánica aplicada. Bajo tales condiciones alcanzó una carga eliminada muy alta y constante de 150 g DQO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. La cinética de eliminación en ese caso fue de orden 0. Vidart (1992) también explotó un reactor biomembrana con soporte de teflón pero insuflando aire a presión a la biopelícula. En este caso se observó tanto cinética lineal (orden 1) como de orden 0, en un rango de carga orgánica eliminada entre 40 y 180 g DQO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. En ambos casos (Eguía, 1991; Vidart, 1992) las expresiones cinéticas obtenidas correlacionaban la carga aplicada con la carga eliminada de DQO. Harremoës (1978) estableció que en procesos biopelícula la velocidad superficial de consumo de sustrato varía entre órdenes de reacción 0 y 1 con respecto a la concentración de sustrato en el seno del líquido. La zona de transición de orden 1 a 0 corresponde a un orden 0.5 de reacción. Harremoës afirma que eso es a lo que se llama cinética tipo Monod.

Basándonos en la transferencia de oxígeno de las fibras huecas sin biopelícula, 5 g m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, es evidente que una estimación a priori de la capacidad del sistema para oxidar materia orgánica por vía aerobia nos arrojaría un resultado aproximado de 10 g DBO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (≈ 20 g DQO m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Sin embargo, los resultados demuestran que la capacidad depuradora del reactor mejora ostensiblemente cuando se desarrolla una biopelícula aerobia. Lo más interesante es que esta mejora no se debe al uso de aireación suplementaria artificial, sino a la mera actividad de la biopelícula. Por lo tanto, la transferencia de oxígeno en un reactor biomembrana puede incrementarse con un coste energético nulo.

El reactor se explotó durante 10 meses. En ese período se pudo observar pérdidas de rendimiento que se contrarrestaban realizando purgas instantáneas del exceso de biopelícula. No se realizaron mediciones del perfil de oxígeno en la biopelícula, pero tanto su aspecto como su color y olor correspondieron al de una biopelícula aerobia.

**Evaluación de la transferencia de oxígeno mejorada por vía biológica.-** El oxígeno consumido provino de dos fuentes: el captado de la atmósfera a través de las fibras huecas, y el aportado con el afluente. No se desoxigenó el agua de alimentación. Mediante balance de materia se computa para cada fuente de aireación su aporte al rendimiento del proceso de oxidación.

La estimación del flujo de oxígeno consumido por la biopelícula proveniente del afluente se basa en las mediciones de OD en las corrientes de entrada y salida del reactor:

$$J_{O,w} = \frac{Q (OD_a - OD_e)}{A} \quad (2)$$

donde  $J_{O,w}$  = flujo de oxígeno desde el seno del agua ( $g O_2 m^{-2} d^{-1}$ );  $OD_a$ ,  $OD_e$  = OD afluente y efluente, respectivamente ( $mg/L$ );  $A$  = área de contacto ( $m^2$ ); and  $Q$  = caudal ( $m^3/d$ ). El flujo de oxígeno a través de las fibras huecas se calcula mediante:

$$J_{O,hf} = J_{O,G} - J_{O,w} \quad (3)$$

donde  $J_{O,hf}$  = flujo de oxígeno a través de las fibras huecas ( $g m^{-2} d^{-1}$ ); y  $J_{O,G}$  = flujo global de oxígeno utilizado para los procesos de oxidación ( $g m^{-2} d^{-1}$ ). El seguimiento de la autoaireación se hizo cuando el reactor funcionaba tanto en estado transitorio como estacionario. La única condición impuesta fue que no se observara un crecimiento apreciable de biomasa en suspensión ni de biopelícula en las paredes del reactor. De tal modo, la oxidación sería sólo imputable a la biopelícula desarrollada sobre las fibras huecas.

En una biopelícula desarrollada sobre membrana se puede producir desnitrificación y, por lo tanto, consumo de materia orgánica debido a crecimiento heterotrofo anóxico. Mediante balance de materia y con la estequiometría adecuada se puede estimar el consumo de oxígeno debido a la demanda carbonosa aerobia como:

$$J_{O,h} = r_{O,h} Y_{O/S} \quad (4)$$

donde  $J_{O,h}$  = flujo de oxígeno debido a la demanda carbonosa aerobia ( $g m^{-2} d^{-1}$ ); y  $r_{O,h}$  = carga orgánica eliminada por oxidación heterotrofa aerobia ( $g DQO m^{-2} d^{-1}$ );  $Y_{O/S}$  = coeficiente estequiométrico =  $0.43 g O_2$  consumido  $g^{-1} DQO$  eliminado.

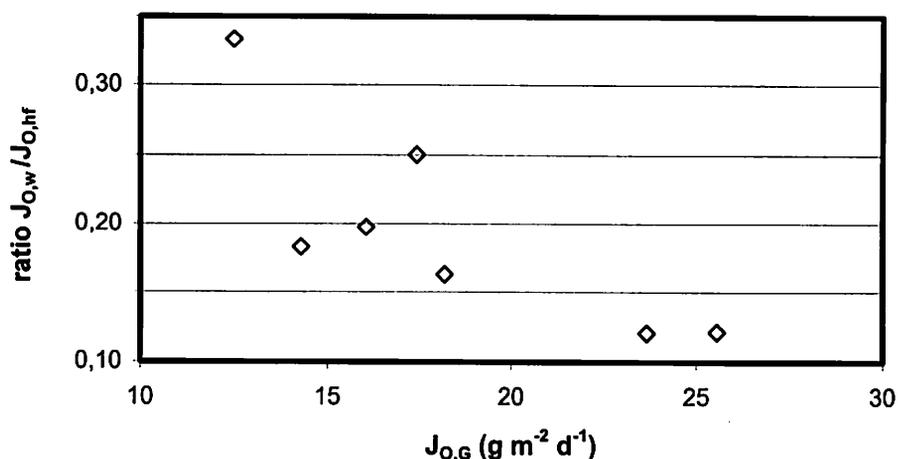
En algunos ensayos se produjo nitrificación, concretamente cuando la carga orgánica aplicada fue baja, en torno a  $25 g DQO m^{-2} d^{-1}$ . El consumo de oxígeno debido a la nitrificación se calcula mediante:

$$J_{O,n} = \frac{4.33 Q (N_e - N_a)}{A} \quad (5)$$

donde  $J_{O,n}$  = flujo de oxígeno debido a la nitrificación ( $g m^{-2} d^{-1}$ );  $N_e$ ,  $N_a$  = concentraciones de nitrato efluente y afluente, respectivamente ( $mg N/L$ ). Luego:

$$J_{O,G} = J_{O,h} + J_{O,n} \quad (6)$$

El mecanismo de transferencia depende del consumo de oxígeno del sistema. El flujo de oxígeno consumido en los procesos de oxidación influye sobre la relación  $J_{O,w}/J_{O,hf}$ . Esta proporción desciende desde valores próximos a 0.34 para  $J_{O,G}$  en el orden de  $12 g O_2 m^{-2} d^{-1}$ , hasta valores próximos a 0.10 cuando  $J_{O,G}$  se aproxima a  $25 g O_2 m^{-2} d^{-1}$  (Fig. 5)



**Figura 5: Efecto del flujo global de oxígeno,  $J_{O,G}$ , sobre los mecanismos de transferencia de oxígeno hacia la biopelícula:  $J_{O,w}$  (desde el seno líquido);  $J_{O,t}$  (a través de las fibras huecas)**

Con respecto a la oxigenación física sin biopelícula ( $\approx 5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), la capacidad de aireación del reactor biomembrana es hasta 5 veces mayor con biopelícula desarrollada sobre las fibras huecas. Por tanto, el mayor flujo de oxígeno se debe al fenómeno de transferencia mejorada por vía biológica. Este fenómeno de transporte estaría relacionado con diferentes factores como por ejemplo la bioturbulencia en el interior de la biopelícula y la carga orgánica eliminada. La bioturbulencia es el transporte inducido por microorganismos motiles, por ejemplo: debido a los gradientes de concentración de sustratos. Un estudio más profundo se requiere para determinar todos los factores que afectan al fenómeno de transferencia de materia mejorada por vía biológica en biopelículas no convencionales o desarrolladas sobre membranas permeables a gases.

Osa *et al.* (1997) realizaron varios estudios que incluían la evaluación de la transferencia de oxígeno mejorada biológicamente en reactores biomembrana de varias tipologías: membranas planas, fibras huecas y membranas tubulares. En general, observaron que el flujo de oxígeno consumido es mayor que la transferencia de oxígeno medida con ensayos de oxigenación en reactores biomembrana. Los resultados indican que el consumo de oxígeno mejorado por vía biológica depende de la carga orgánica, aplicada y eliminada, y del espesor de biopelícula.

## CONCLUSIONES

En un reactor biomembrana sin aireación artificial es viable una biopelícula aerobia para la oxidación de materia orgánica e incluso nitrificación.

La magnitud de esta oxidación depende de la carga oxidable eliminada. Cuando la carga orgánica eliminada por oxidación aerobia alcanza valores en torno a  $60 \text{ g DQO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , el 90 % del rendimiento global del proceso se debe a la auto-aireación de la biopelícula mediante transferencia mejorada de oxígeno por vía biológica.

La presencia de la biopelícula mejora la transferencia de oxígeno. Esta mejora multiplica hasta por 5 la capacidad de aireación de las fibras huecas limpias.

El empleo de membranas hidrófobas (como las fibras huecas) permeables a gases como soporte de una biopelícula aerobia con alimentación en contra-corriente de oxígeno y nutrientes permite la autoaireación de los microorganismos. A escala industrial un proceso de estas características podría conseguir una reducción significativa de los costes debido al menor consumo de energía que se podría alcanzar.

**Agradecimientos.-** Esta investigación fue financiada parcialmente por la Comisión de Ciencia y Tecnología de España (CICYT AMB94-0879). La investigación fue coordinada por el Grupo

Biopelícula de la Universidad de Cantabria y la empresa PRIDESA, S.A. Finalmente, se agradece a la empresa Akso Faser AG que donó las membranas utilizadas como soporte.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Warith, A.S., Williamson K.J., Strand S.E. (1990). Substratum aerated biofilm reactor. *National Conference of Environmental Engineering*, ASCE (New York), 360 – 365.
- Amieva, J.J. (1993). "Viabilidad del proceso Biopelícula Extraíble, BE. Aplicación a un RBC". Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, España.
- APHA, AWWA, and WPCF. (1992). *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales*. Ediciones Díaz de Santos, S.A., Madrid (Spain). Spanish translation of standard methods for the examination of water and wastewater, 17<sup>th</sup> Ed.
- Bezanilla, J.A. (1993). "Depuración de aguas residuales en un Contactor Biológico Rotatorio (RBC) con alternancia en el sentido del flujo" Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, España.
- Eguía, E. (1991). "Desarrollo de la biopelícula en medio soporte permeable". Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, España.
- Harremoës, P. (1978). "Biofilm kinetics". In: *Water Pollution Microbiology*. R. Mitchell, ed., John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Hinton, S. W. y Stensel, H. D. (1994). "Oxygen utilization of trickling filter biofilms". *J. Env. Eng.*, 120 (5): 1284 - 1297.
- Jácome, A. (1999). "Modelación y cinética de oxidación de materia orgánica y nitrificación simultáneas en biopelículas autoaireadas" Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, España.
- Lolmede, Ph., Vidart, T., Eguía, E., Tejero, I. (1993). "Effect of high concentrations of nitrates on a biofilm process with permeable support to gases using air." *Second Int. Spec. Conference on Biofilm Reactors*, París (Francia), 801 – 802.
- Onishi, H., Numazawa, R. (1982) "Biochemical process for purifying contaminated water." European patent application 0 049 959.
- Osa, J.J., Eguía, E., Vidart, T., Jácome, A., Lorda, I., Amieva, J.J., Tejero, I. (1997). Wastewater treatment with biomembrane reactors. *Int. Conf. on Advanced Wastewater Treatment Process*, Leeds, U.K. (8-11th september), 1-11.
- Paolini, A. (1986). "Effect of biomass on oxygen transfer." *J. WPCF*, 58 (4): 306 - 311.
- Timberlake, D.L., Strand, S.E., Williamson, K.J. (1988). "Combined aerobic heterotrophic oxidation, nitrification and denitrification in a permeable support biofilm." *Wat. Res.*, 22 (12): 1.513 - 1.517.
- Vidart, T. (1992). "Biopelícula en medio soporte permeable con aportación de aire". Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, España.